

# 电机学

## 三相变压器的不对称运行及瞬态过程

东南大学电气工程学院

黄允凯



东南大学  
电气工程学院



1

对称分量法

2

三相变压器的各序阻抗及其等效电路

3

三相变压器Yyn连接单相运行

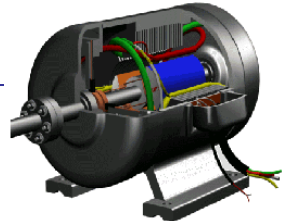
4

变压器二次侧突然短路时的瞬态过程

5

变压器空载合闸时的瞬态过程





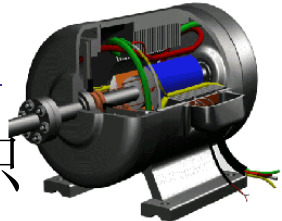
不对称运行状态的主要原因：

- ①外施电压不对称。三相电流也不对称。
- ②各相负载阻抗不对称。当初级外施电压对称，三相电流不对称。不对称的三相电流流经变压器，导致各相阻抗压降不相等，从而次级电压也不对称。
- ③外施电压和负载阻抗均不对称。

## 着重分析

- 不对称运行的分析方法
- 正序阻抗、负序阻抗及零序阻抗的物理概念及测量方法
- 危害性——三相变压器在Y， $y_n$ 连接时相电压中点浮动的原因及其危害





- **对称的三相系统：**三相中的电压 $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$ 对称，只有一个独立变量。如三相相序为a、b、c，由 $U_a$ 得出其余两相电压

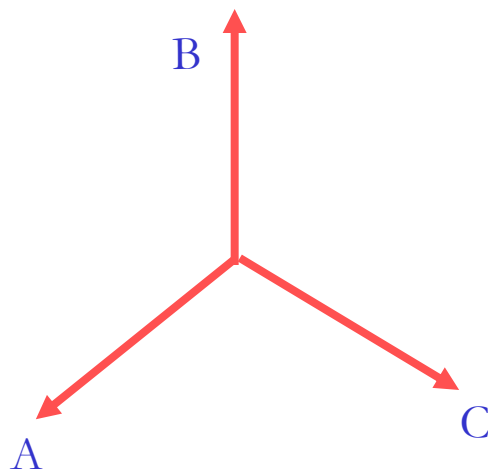
$$U_b = \alpha^2 U_a, U_c = \alpha U_a$$

- **复数算子**  $\alpha = e^{j120^\circ} = e^{-j240^\circ}$

$$\alpha = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ$$

$$\alpha^2 = e^{j240^\circ} = e^{-j120^\circ}$$

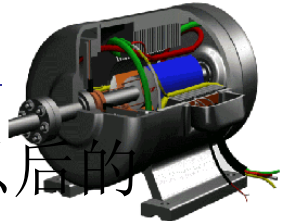
$$\alpha^3 = e^{j360^\circ} = e^{j0} = 1$$



- **三相不对称系统：**三相中的电压 $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$ 互不相关——大小不一定相等，相位关系不固定

$U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$ 为三个独立变量

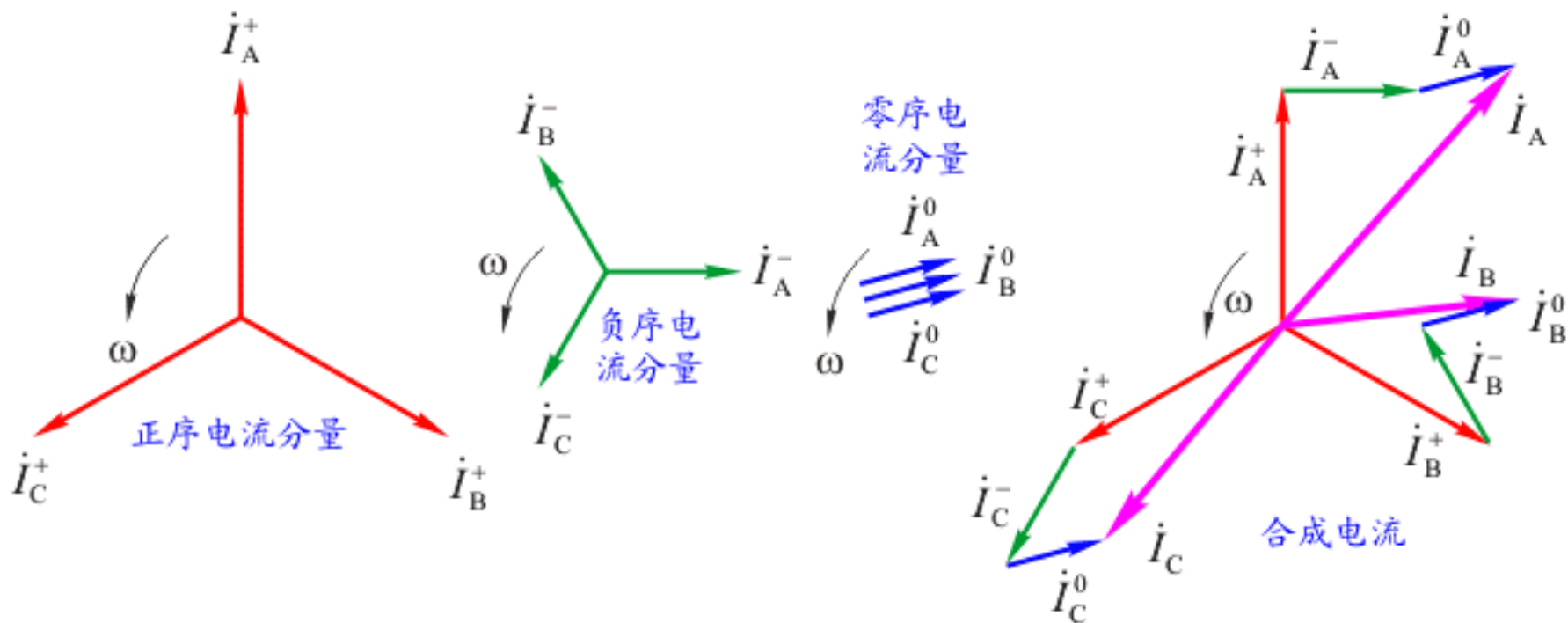




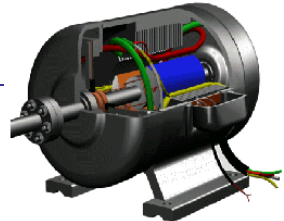
- 对称分量法**是分析三相不对称运行的基本方法。在以后的章节中还会用到。

任意一组三相不对称的物理量（电压、电流等）均可分解成三组同频率的对称的物理量。

以电流为例，说明如下：



对称分量及其合成相量



- 把**不对称**的三相系统分解为三个独立的对称系统，  
**即正序系统、负序系统和零序系统**
- 下标“+”、“-”、“0”分别表示正序、负序和零序

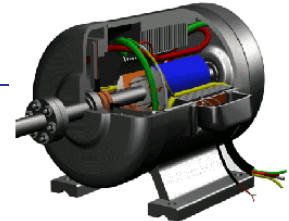
$$\dot{I}_A = \dot{I}_A^+ + \dot{I}_A^- + \dot{I}_A^0$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_B^+ + \dot{I}_B^- + \dot{I}_B^0 = a^2 \dot{I}_A^+ + a \dot{I}_A^- + \dot{I}_A^0$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_C^+ + \dot{I}_C^- + \dot{I}_C^0 = a \dot{I}_A^+ + a^2 \dot{I}_A^- + \dot{I}_A^0$$

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_A^+ \\ \dot{I}_A^- \\ \dot{I}_A^0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \dot{I}_A^+ \\ \dot{I}_A^- \\ \dot{I}_A^0 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{pmatrix}$$





- 结论

(1) 正序、负序和零序系统都是对称系统。

当求得各个对称分量后，再把各相的三个分量叠加便得到不对称运行情形。

(2) 不同相序具有不同阻抗参数，电流流经电机和变压器具有不同物理性质。

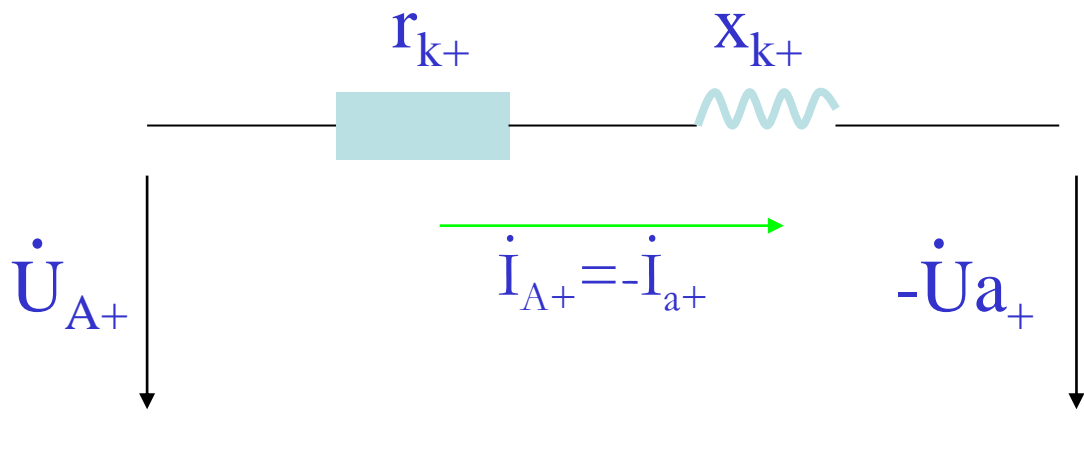
(3) 对称分量法根据叠加原理，只适用于线性系统中。





- 正序阻抗和正序等效电路

前几节所讲的等效电路实际上是三相变压器的正序等效电路，其简化等效电路图如图所示



$$Z_{+} = r_{k+} + jx_{k+} = r_k + jx_k = Z_k$$

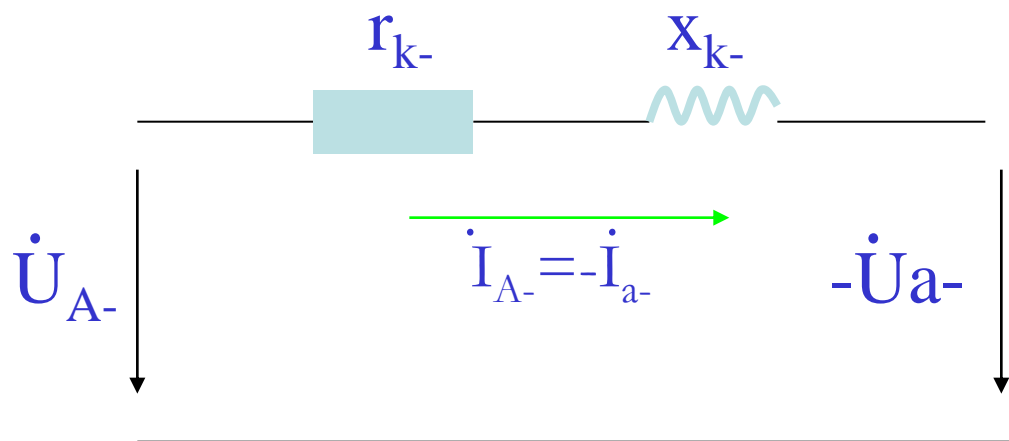






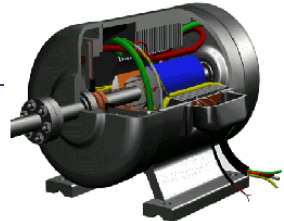
## • 负序阻抗和负序等效电路

对负序分量而言，其等效电路与正序没有什么不同，因为各相序电流在相位上也是彼此相差 $120^\circ$ ，至于是B相超前C相，还是C相超前B相，变压器内部的电磁过程都是一样的。于是负序等效电路与正序一样



$$Z_{-} = r_{k-} + jx_{k-} = r_k + jx_k = Z_k$$



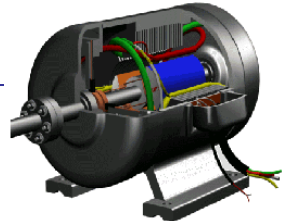


- 零序阻抗和零序等效电路

零序电流所遇到的阻抗与磁路结构有很大关系

1. 零序电流在变压器绕组中的流通情况
2. 零序等效电路
3. 零序磁通在变压器铁芯中流通路径
4. 零序激磁阻抗测量方法





## 零序电流在变压器绕组中的流通情况

- 零序电流能否流通与三相绕组的连接方式有关。

Y接法中无法流通

YN接法可以流通

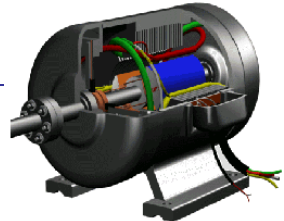
D接法线电流不能流通零序电流，但其闭合回路能为零序电流提供通路，如果另一方有零序电流，通过感应也会在D接法绕组中产生零序电流。

Y, y; Y, d; D, y; D, d——无零序电流

YN, d和D, yn接法——如YN或yn中有零序电流，d或D中也感应零序电流。

YN, y和Y, yn接法——当YN或yn中有零序电流，y或Y中也不会有零序电流。



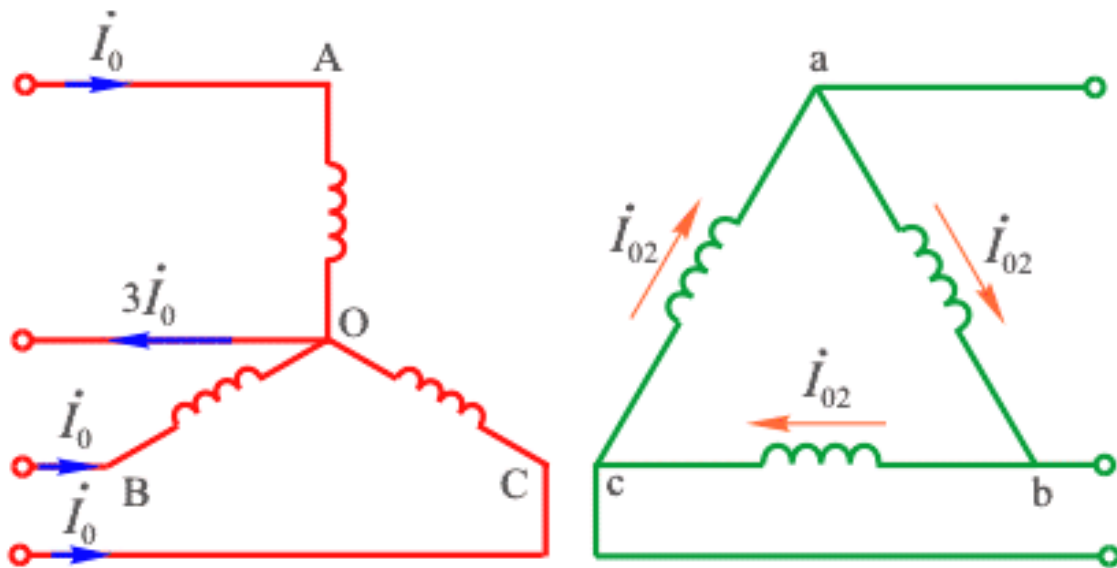


## • 零序等效电路

- (1) 首先分析零序电流的来源；
- (2) 确定初、次级侧相、线中的零序电流情况；
- (3) 零序电流的等效电路；
- (4) 对运行的影响。

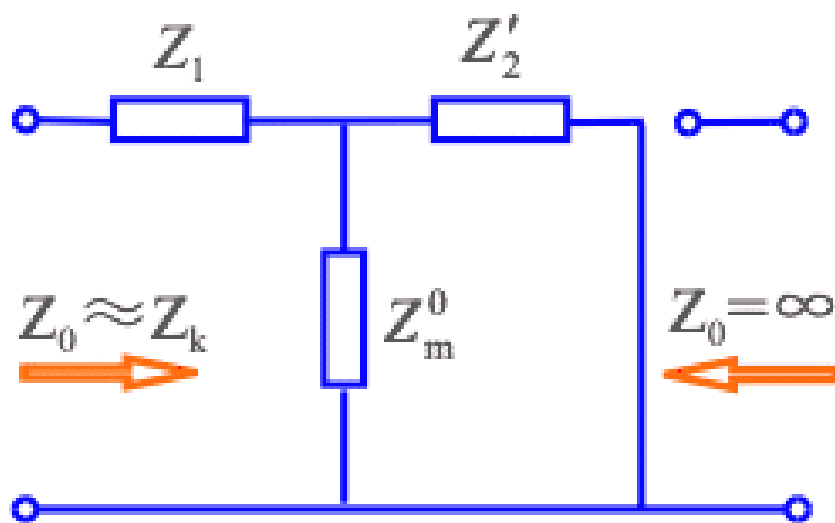
### ➤ YN, d接法的零序等效电路

初级、次级侧均能流通零序电流，但是不能流向次级侧负载电路





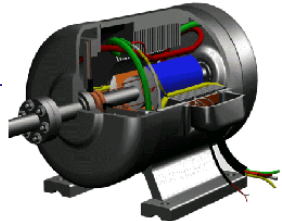
一次侧绕组有中线，零序电流可以流通，而二次侧组的三角形联接使零序电流处于短路状态，所以从一次侧看进去，其等效电路如图



YN，d接法的零序阻抗是一很小的阻抗。

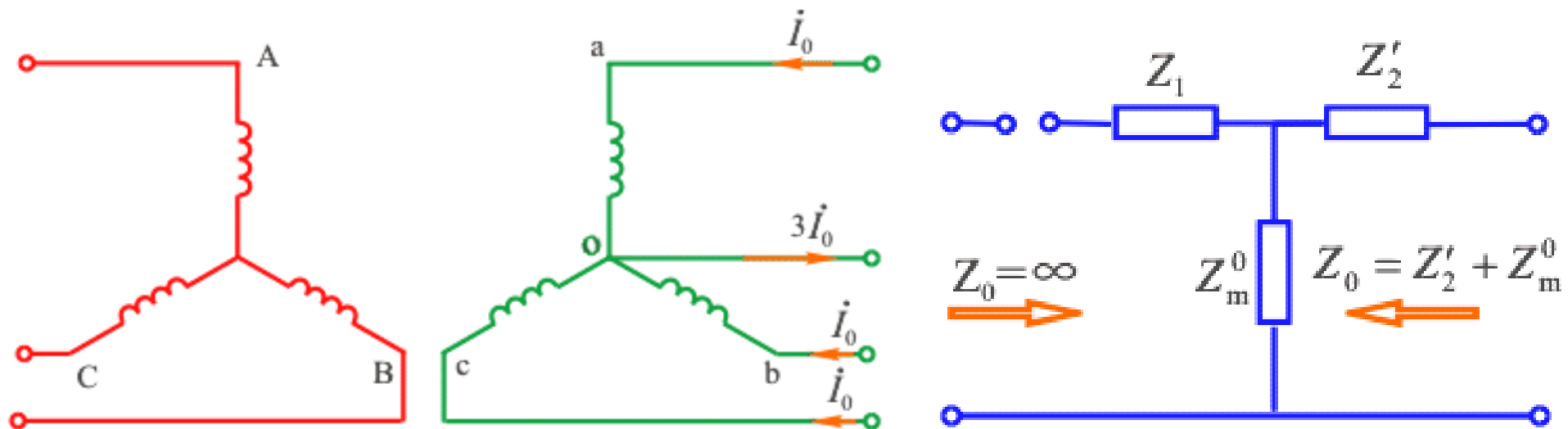
电源有较小的 $U_{A0}$ ，会引起较大的零序电流，导致变压器过热。  
应有保护措施监视中线电流。





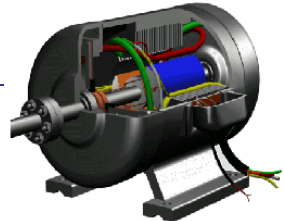
## ➤ Yyn接法的零序等效电路

- 零序电流由次级侧有中线电流引起
- 初级侧无零序电流，但感应零序（相）电势



- 如果 $Z_0$ 较大，较小的中线电流会造成相电压较大的不对称。  
其不对称的程度还与变压器的磁路有关。





- 零序磁通在铁芯中流通路径
- 由于三相的零序电流在时间上同相位，所产生的三相零序磁通及其感应的三相零序电势各相均同相位。
- 零序磁通及其感应电势的大小与磁路系统有关。

## (1) 三相磁路独立

零序磁通路径与正序、负序磁路相同，磁阻较小，激磁阻抗较大

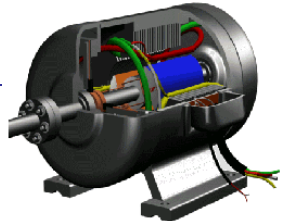
$$Z_{m0} = Z_m = r_m + jx_m$$

## (2) 三相磁路相关

零序磁通只匝链各自绕组，以变压器油及油箱壁为回路，磁阻较大，零序激磁阻抗较小

$$Z_{m0} \ll Z_m$$





## •零序阻抗测量方法

YN, d或D, yn接法:  $z_{k0} = z_k$       不计零序激磁阻抗

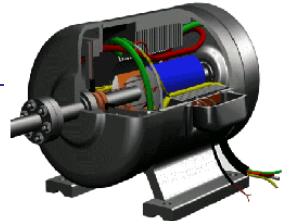
Y, yn或YN, y接法: —模拟施加三相零序电压

Y, yn: 把次级三个相绕组按首尾次序串联, 接到单相电源, 初级方开路。

测量电压U、电流I和输入功率P, 计算出零序激磁阻抗







零序电流由次级侧有中线电流引起

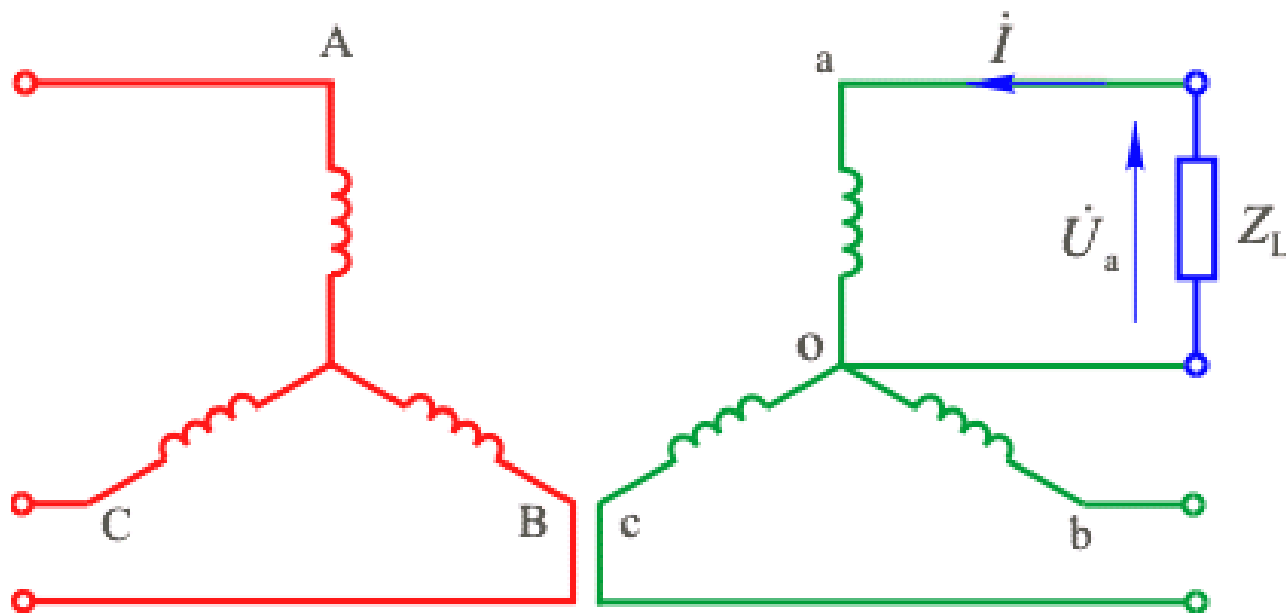
初级侧无零序电流，但感应零序（相）电势，有较大零序阻抗。

$$\dot{U}_{a0} = \dot{I}_{a0} * Z_0 = \dot{I}_{a0} * (Z_2 + Z_{m0})$$

如果 $Z_0$ 较大，较小的中线电流会造成相电压较大的不对称。其不对称的程度还与变压器的磁路有关。

- 假设：外施电压为对称三相电压
- 目的：分析Y，yn接法中的零序电流的影响





Yyn带单相负载

已知变压器参数和一次侧外施电压

- 负载电流 $I$
- 初级侧电流 $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$
- 初级、次级侧相电压 $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$ 和 $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$ 。



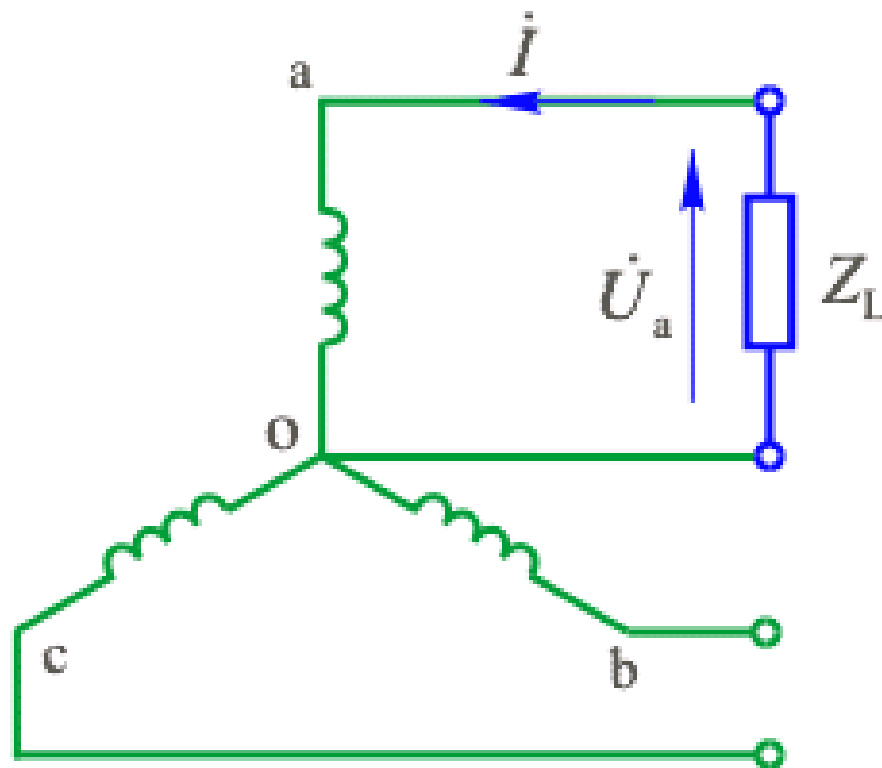


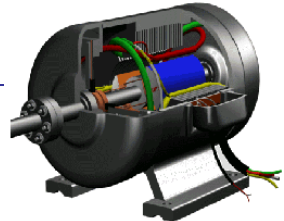
## 步骤1. 列出端点方程

$$\dot{I}_a = \dot{I}$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_c = 0$$

$$\dot{U}_a = \dot{I}Z_L$$





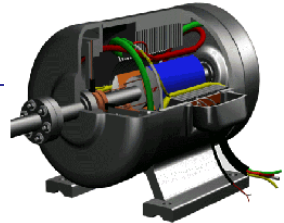
## 步骤2. 分解为不对称分量

$$\begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I} \\ \dot{I}_b &= \dot{I}_c = 0 \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} \dot{I}_{a+} &= \frac{1}{3} (\dot{I}_a + \alpha \dot{I}_b + \alpha^2 \dot{I}_c) = \frac{1}{3} \dot{I} \\ \dot{I}_{a-} &= \frac{1}{3} (\dot{I}_a + \alpha^2 \dot{I}_b + \alpha \dot{I}_c) = \frac{1}{3} \dot{I} \\ \dot{I}_{a0} &= \frac{1}{3} (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) = \frac{1}{3} \dot{I} \end{aligned}$$

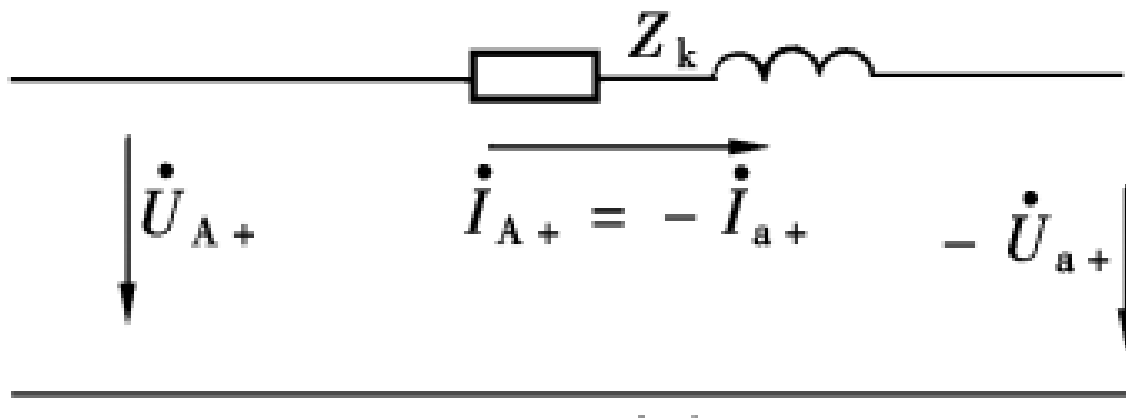
初级侧星形连接，无零序电流通路，相电流只有正序与负序分量

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{A+} + \dot{I}_{A-} = -(\dot{I}'_{a+} + \dot{I}'_{a-}) = -\frac{2}{3} \dot{I}' \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{B+} + \dot{I}_{B-} = -(\alpha^2 \dot{I}'_{a+} + \alpha \dot{I}'_{a-}) = \frac{1}{3} \dot{I}' \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{C+} + \dot{I}_{C-} = -(\alpha \dot{I}'_{a+} + \alpha^2 \dot{I}'_{a-}) = \frac{1}{3} \dot{I}' \end{aligned}$$



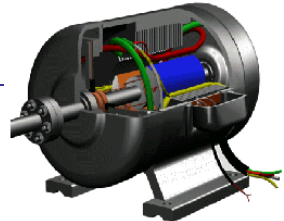


- 条件: **外施线电压为对称**, 没有负序分量电压和零序分量电压, 各绕组上的正序电压  $\dot{U}_{A+}$ 、 $\dot{U}_{B+}$ 、 $\dot{U}_{C+}$  即为电源相电压。

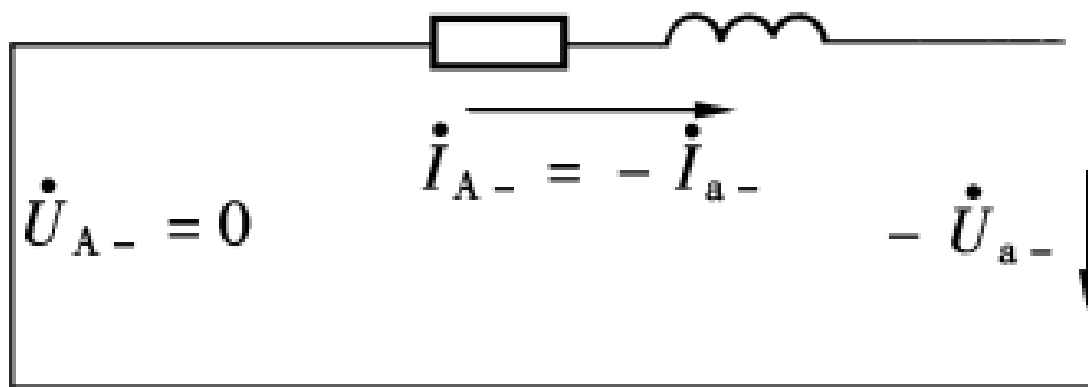


- 次级侧产生负序分量电流和零序分量电流, 产生相应的负序磁通和零序磁通, 在初级、次级绕组中感应负序分量电压和零序分量电压。



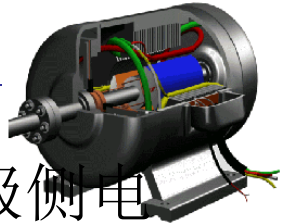


- 初级侧中感应的负序电压产生初级侧负序电流 $\dot{I}_{A-}$ 、 $\dot{I}_{B-}$ 、 $\dot{I}_{C-}$ ，以电源为回路，对负序电流初级、次级磁势平衡，次级负序压降即为负序阻抗压降（漏电抗压降），值不大。

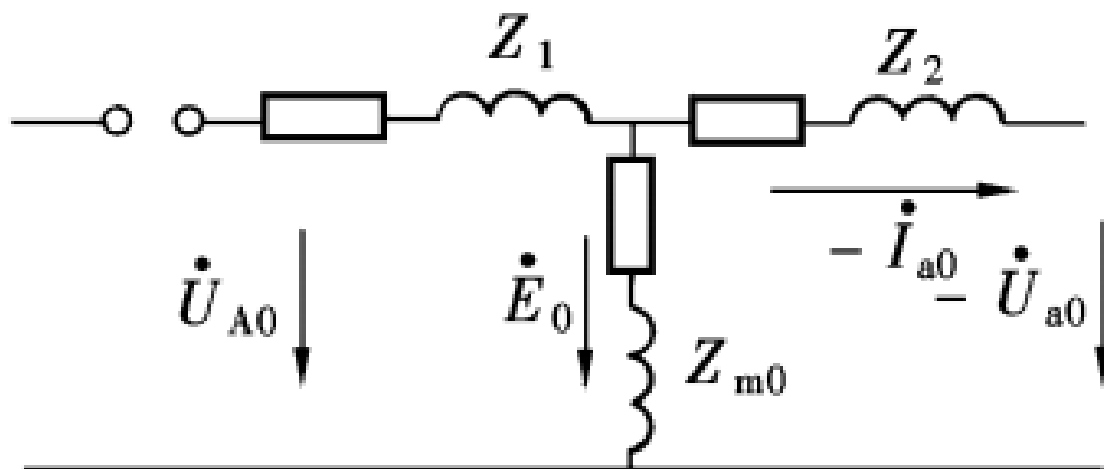


由于原方外施电压是三相对称的，无负序分量，即 $\dot{U}_{A-}=0$ 。  
但原方的负序电流以电源为路径，等效电路中原方是短路的。

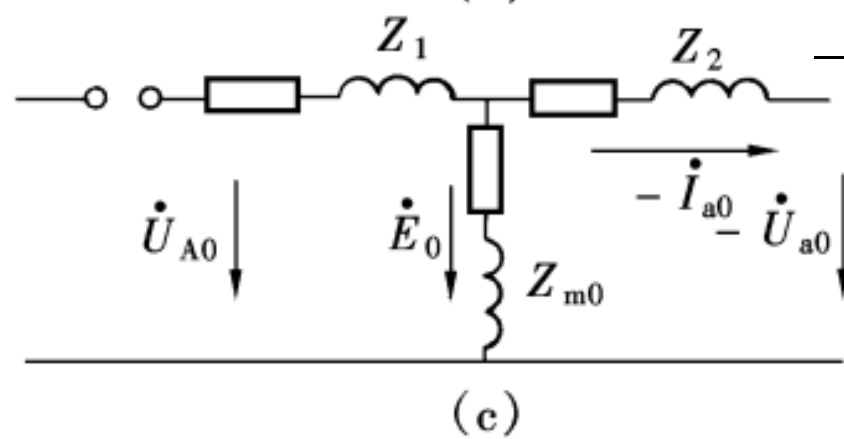
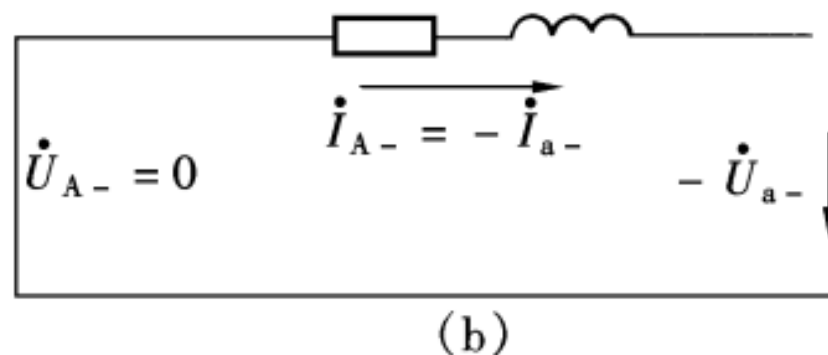
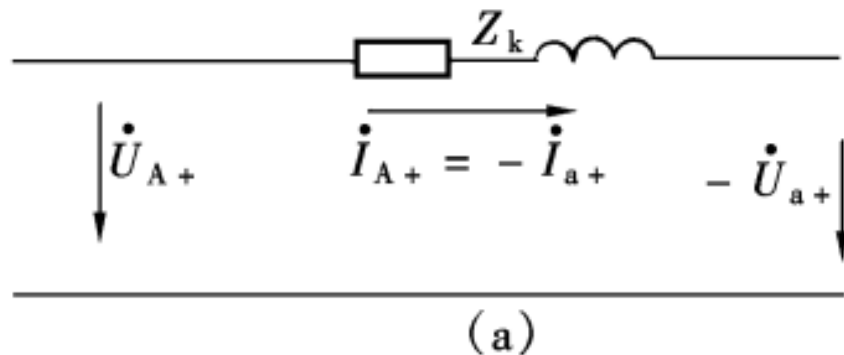




- 在Y, yn接法中, 零序电流只能在次级侧流通, 在初级侧电路中虽感应有零序电势, 但无零序电流流通。
- $I_{a0}$ 、 $I_{b0}$ 、 $I_{c0}$ 为激磁性质电流, 建立起同时和原、副线圈交链的零序主磁通, 在原、副线圈中感应零序电势 $E_0$ 。
- 初级侧的零序电压即等于零序电势。



# 三相变压器Yyn连接单相运行



$$-\dot{U}_{a+} = \dot{U}_{A+} + \dot{I}_{a+} Z_k$$

$$-\dot{U}_{a-} = \dot{I}_{a-} Z_k$$

$$-\dot{U}_{a0} = -\dot{E}_0 + \dot{I}_{a0} Z_2$$

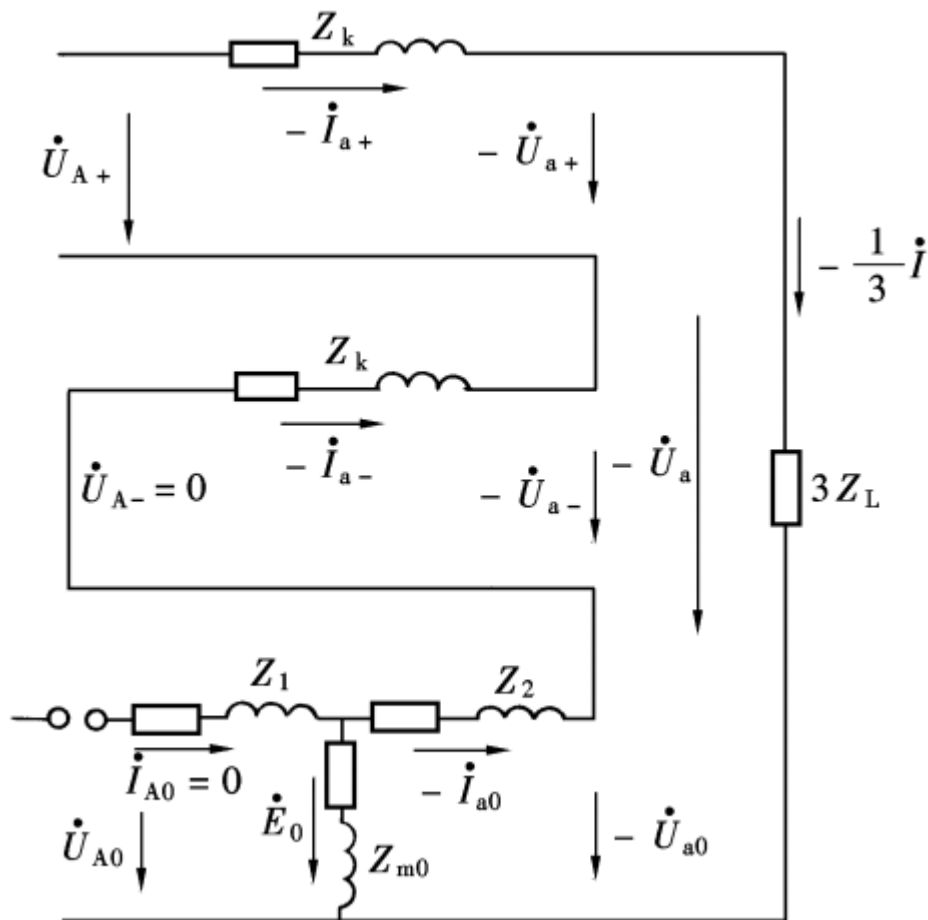
$$\dot{U}_{A0} = -\dot{E}_0$$

$$-\dot{I}_{a+} = -\dot{I}_{a-} = -\dot{I}_{a0} = \frac{\dot{U}_{A+}}{2Z_k + Z_2 + Z_{m0} + 3Z_L}$$





# 三相变压器Yyn连接单相运行



$$-\dot{U}_{a+} = \dot{U}_{A+} + \dot{I}_{a+} Z_k$$

$$-\dot{U}_{a-} = \dot{I}_{a-} Z_k$$

$$-\dot{U}_{a0} = -\dot{E}_0 + \dot{I}_{a0} Z_2$$

$$\dot{U}_{A0} = -\dot{E}_0$$





- a相电流为:

$$-\dot{I}_{a+} = -\dot{I}_{a-} = -\dot{I}_{a0} = \frac{\dot{U}_{A+}}{2Z_k + Z_2 + Z_{m0} + 3Z_L}$$

- 负载电流为:

$$-\dot{I} = -(\dot{I}_{a+} + \dot{I}_{a-} + \dot{I}_{a0}) = \frac{3\dot{U}_{A+}}{2Z_k + Z_2 + Z_{m0} + 3Z_L}$$

- 如略去 $Z_k$ 和 $Z_2$

$$-\dot{I} = \frac{3\dot{U}_{A+}}{Z_{m0} + 3Z_L}$$

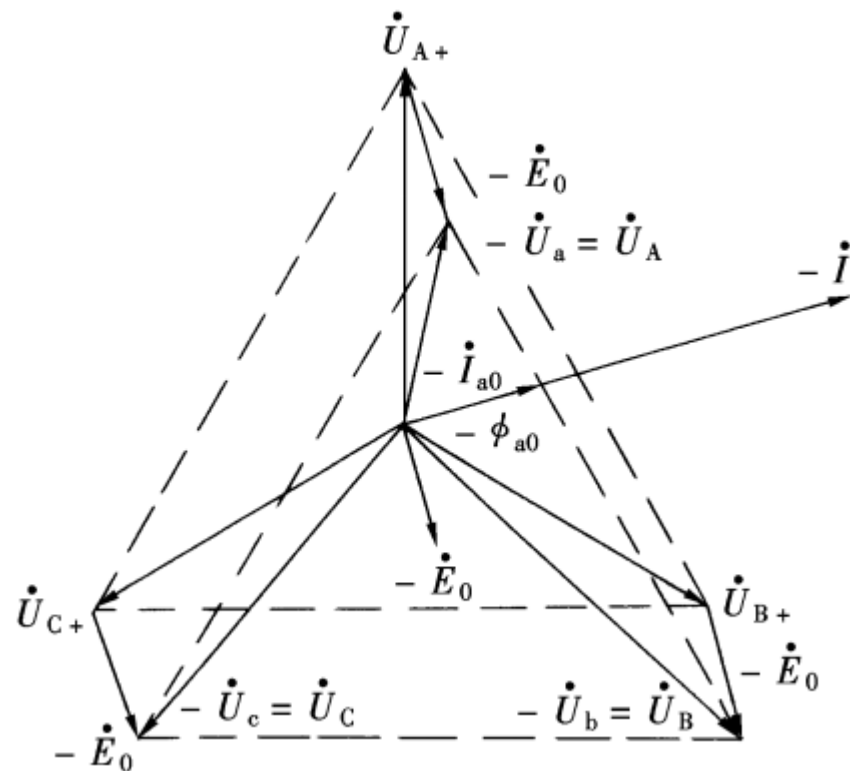
零序激磁阻抗相当于在负载中增加了一个阻抗 $Z_{m0}/3$

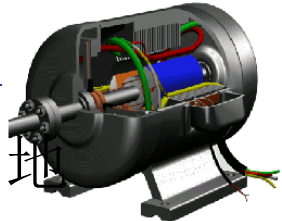




## 零点浮动

- 外施电压对称，当次级侧接有单相负载后，在每相绕组上都叠加有零序电势，造成相电压不对称，在相量图中表现为相电压中点 $0'$ 偏离了线电压三角形的几何中心 $0$ 。
- 中点浮动的程度主要取决于零序电势 $E_0$ ， $E_0$ 的大小取决于零序电流的大小和磁路结构。





- **三芯柱结构**，零序磁通的磁阻较大(即 $Z_{m0}$ 较小)。适当地限制中线电流，则 $E_0$ 不会太大。运行规程规定三芯柱变压器如按Y，yn接法运行应限制中线电流不超过 $0.25 I_N$ 。

$$\text{中线电流 } I_0 = I_a + I_b + I_c = 3I_{a0}$$

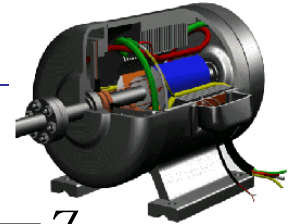
$$\text{则: } I_{a0} \text{ 应小于 } 0.0833 I_N$$

$$\text{设 } Z_{m0}^* = 0.6, I_{a0} = 0.0833 I_N$$

$$\text{则 } E_0^* = I_{a0}^* Z_{m0}^* = 0.05, \text{ 相电压偏移不大。}$$

**影响：** 零序磁通途经变压器油箱，引起油箱壁局部发热。





- 三相变压器组，各相磁路独立，零序磁阻较小， $Z_{m0} = Z_m$ 。  
很小的零序电流也会感应很大的零序电势，中点有较大的浮动，造成相电压严重不对称。

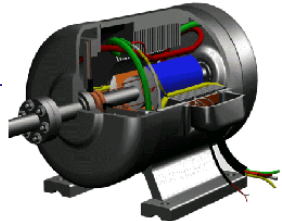
如一相发生短路，即 $Z_L = 0$

$$-I = 3U_{A+}/Z_m = 3I_0 \quad \text{短路电流仅为正常激磁电流的3倍}$$

$U_a = 0$ ，则 $E_0 = U_{A+}$ ，零序电势大，中点浮动到A顶点  
叠加于BC相，B、C相电压均等于原额定线电压。

**结论：** 三相变压器组不能接成Y，yn运行。

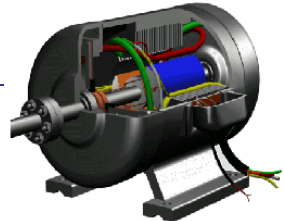




## 小结

- 不对称运行的分析常采用对称分量法——把不对称的三相电压或电流用对称分量法分解为对称的正序分量系统、负序分量系统和零序分量系统。分别对各对称分量系统作用下的运行情况进行分析，然后把各分量系统的分析结果叠加起来，便得到不对称运行时总的分析结果。
- 零序分量电流三相同相，其流经变压器的情况与变压器的连接方法有关：
  - ①Y, y; Y, d; D, y; D, d连接无零序电流。
  - ②YN, d; D, yn连接零序电流在双侧绕组内均可流通。
  - ③YN, y; Y, yn连接零序电流只能在YN、yn侧流通。
- 在零序电流可以流通的连接组中，其零序阻抗的大小还与变压器的磁路结构有关。

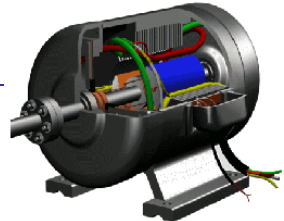




## 不对称运行的分析步骤

- 列出端点方程式
- 把不对称的三相电压和电流分解为对称分量
- 列出相序方程式，画出等效电路图
- 求解电流和电压，或作出相量图用于定性分析





## • 突然短路电流

忽略励磁电流,  $i_k = i_1 = -i_2'$

等效电路的电压方程  $L_k \frac{di_k}{dt} + r_k i_k = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + a)$

$L_k$  -- 变压器的漏感,  $L_k = L_1 + L_2' = \frac{1}{\omega} (x_1 + x_2') = \frac{x_k}{\omega}$

$\alpha$  -- 短路瞬间电压的初相角

$$i_k = i_{ks} + i_{kt}$$

$$= \sqrt{2} \frac{U_1}{Z_k} \sin(\omega t + \alpha - \theta_k) + C e^{-\frac{r_k}{L_k} t}$$

稳态短路电流分量  
-- 决定于电压和短路阻抗的大小

$$\theta_k = \tan^{-1} \frac{x_k}{r_k} \quad \dots \quad \text{短路阻抗角}$$

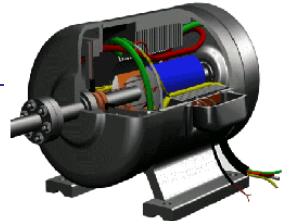
瞬态短路电流分量  
 $C = -\sqrt{2} I_k \sin(\alpha - \theta_k)$

$$T_k = \frac{L_k}{r_k} \quad \dots \quad \text{瞬态电流衰减时间常数}$$

还与短路时电压初相较有关







## 突然短路电流的最大值与衰减

$$i_k = \sqrt{2}I_k \left( \sin(\omega t + \alpha - \theta_k) - \sin(\alpha - \theta_k) e^{-\frac{r_k}{L_k} t} \right)$$

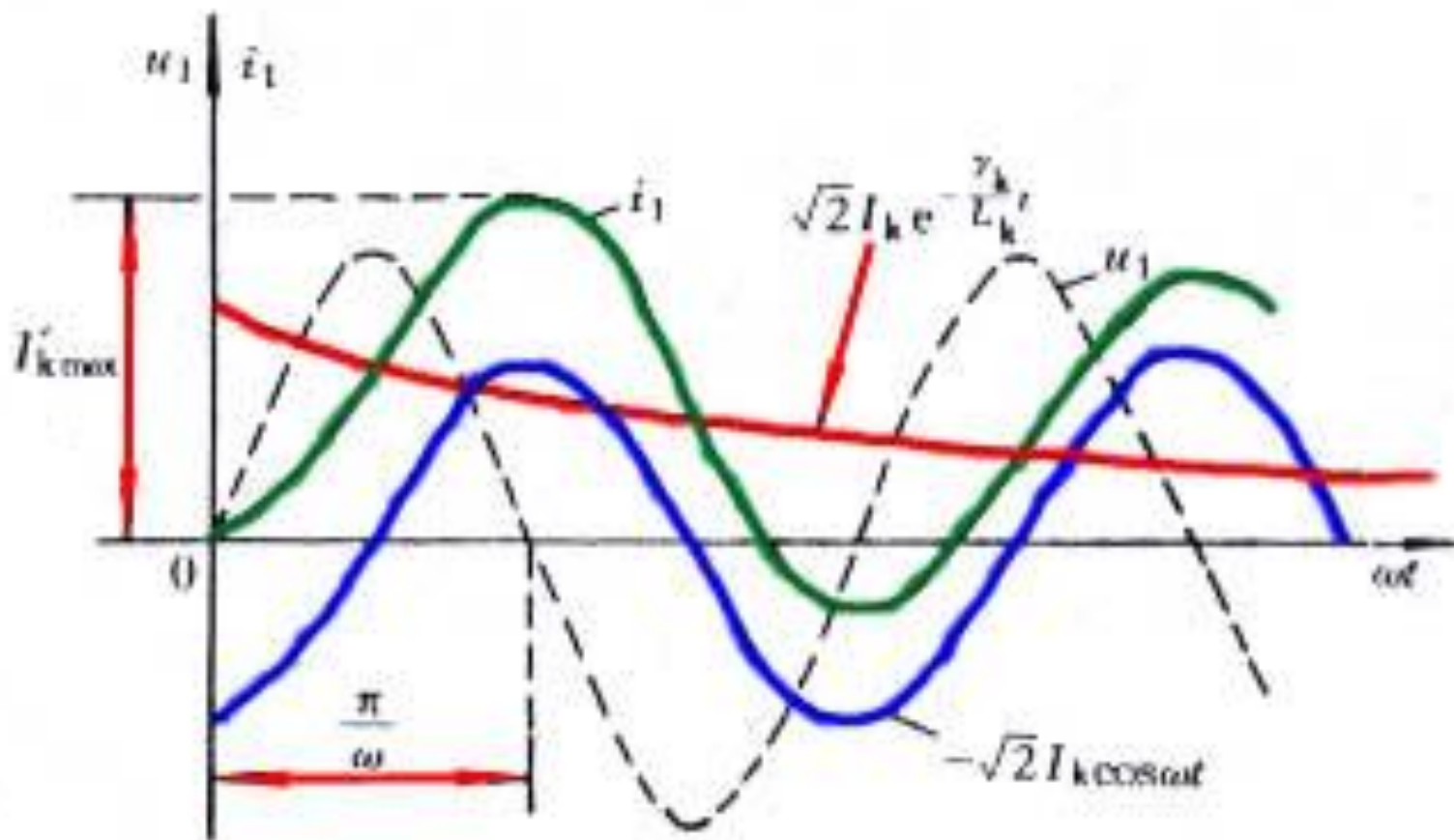
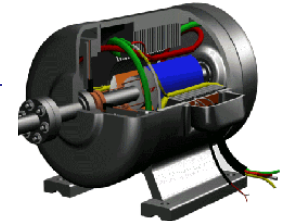
1. 当 $\alpha = \theta_K$ 时，瞬态电流分量为0，短路后立刻进入稳态。
2. 当 $\alpha = \theta_K \pm 90^\circ$ 时，瞬态分量有最大值，在短路后的半周期电流达到最大值。

$$i_{k \max} \Big|_{\omega t = \pi} = \sqrt{2}I_k \left( 1 + e^{-\frac{r_k}{x_k} \pi} \right) = \sqrt{2}I_k k_s$$

$k_s$  ... 突然短路电流最大值对稳态短路电流的倍数  
中小型变压器在1.2–1.35，大型变压器在1.75–1.81



## 次级突然短路时的瞬态过程



在最严重情况下的突然短路电流





## 过电流的影响

### 过电流情况分析:

设外施电压为额定值,  $z_{k*}=0.055$ ,  $r_k/x_k=1/3$ , 则

$$\frac{i_{\max}}{\sqrt{2}I_N} = \frac{k_s}{z_{k*}} = \frac{1.35}{0.055} = 24.5$$

短路瞬间的冲击电流很大。





## 发热现象：

设外施电压为额定值， $z_{k*}=0.055$ ，则

$$I_k = \frac{U_N}{z_k} = \frac{1}{z_{k*}} I_N = \frac{1}{0.055} I_N = 18 I_N$$

短路电流产生的铜损耗是正常铜损耗的 $18^2$ 倍。

影响：

**使绕组温度急剧上升，产生过热，需进行过热保护。**



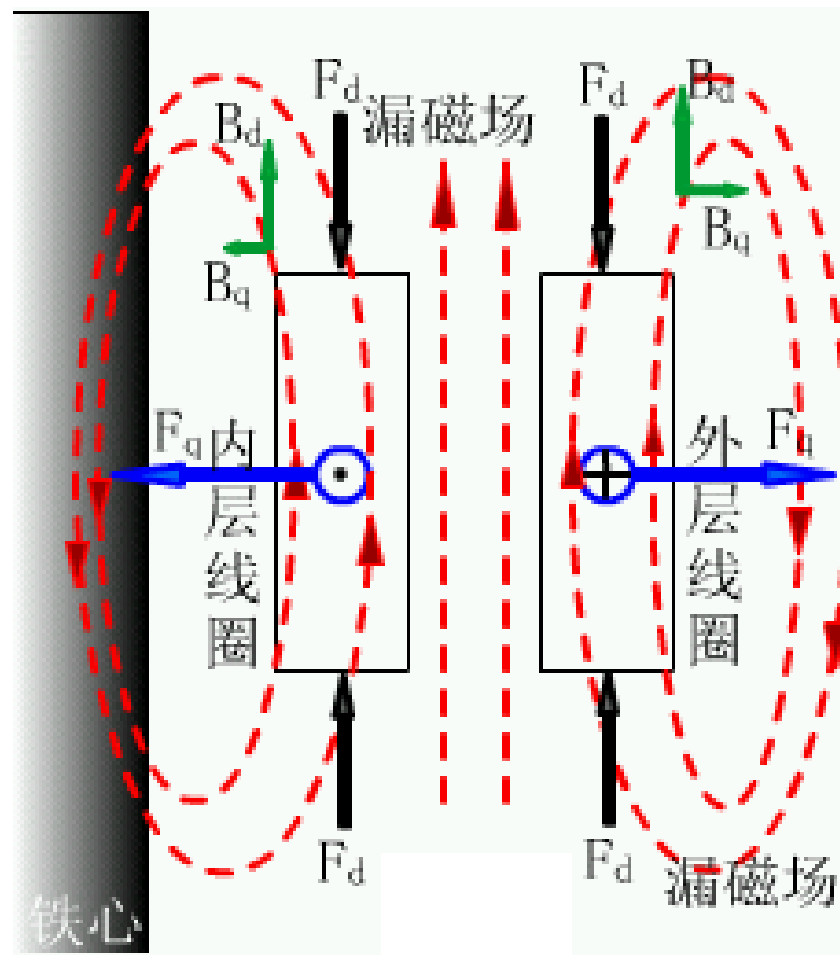


## 电磁力作用：

电磁力（由漏磁场和电流作用产生）也与电流的平方成正比，绕组上产生很大的机械应力，径向有外张力和内压力，轴向里从绕组两端挤压绕组。

措施：

**加强绕组的机械强度；  
设计较大的短路阻抗限制电流。**





## ●合闸瞬间的励磁电流

励磁电流瞬时值 $i_m$ :

$$N_1 \frac{d\Phi_1}{dt} + r_1 i_m = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \alpha) \quad \dots \quad \text{回路电压方程}$$

$$\Phi_1 = f(i_m) \quad \dots \quad \text{磁化曲线}$$

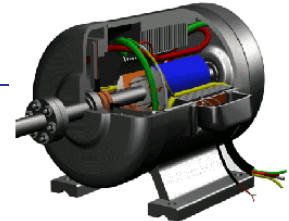
忽略 $r_1 i_m$ 。假设电感为常数 $L_{av}$ ，则:

$$L_{av} = \frac{N_1 \Phi_1}{i_m} \quad \rightarrow \quad i_m = \frac{N_1 \Phi_1}{L_{av}}$$

$\Phi_1$ 的线性方程

$$N_1 \frac{d\Phi_1}{dt} + \frac{r_1 N_1}{L_{av}} \Phi_1 = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \alpha)$$





磁通的解，包括稳态分量 $\Phi_1'$ 和瞬态分量 $\Phi_1''$ ：

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= \Phi_1' + \Phi_1'' \\ &= \frac{\sqrt{2}U_1}{N_1\omega} \sin(\omega t + \alpha - 90^\circ) + Ce^{-\frac{r_1}{L_{av}}t} \\ &= \Phi_m \left( \sin(\omega t + \alpha - 90^\circ) + \cos \alpha e^{-\frac{r_1}{L_{av}}t} \right)\end{aligned}$$

(1) 接通电源瞬间 $\alpha=0$

$$\Phi_1 = -\Phi_m \sin \omega t + \Phi_m e^{-\frac{r_1}{L_{av}}t}$$

半周期后磁通最大  
磁路高度饱和，激磁电流很大

(2) 接通电源瞬间 $\alpha=90^\circ$

$$\Phi_1 = \Phi_m \sin \omega t$$

立即进入稳态，无冲击电流





## 空载合闸过电流的影响

数倍于额定电流，远小于短路电流，对变压器本身无直接危害

合闸开始后数周期内的冲击电流可能使变压器的保护装置误动作

**措施：**合闸使串如限流电阻，（1）限制冲击电流；  
（2）使其快速衰减。

